مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1394، دوره 15، شماره 2، ص‌ص 61-71

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اثر سرعت ابزار بر سختی و تنش پسماند در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 با روش تجربی و شبیه‌سازی عددی

دانیال قهرمانی‌مقدم[1]، خلیل فرهنگ‌دوست[2*]، علی رستگار[3]، محمد رمضانی‌مقدم[4]

1- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

3- دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

4- دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* مشهد، صندوق پستی 48974-91779، farhang@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 آبان1393

پذیرش: 01 آذر 1393

ارائه در سایت: 29 آذر 1393

کلید واژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

تنش پسماند

روش پراش اشعه ایکس

روش اجزا محدود

آلیاژ آلومینیوم 2024-T351

چکیده

در این تحقیق، ساختار میکروسکوپی، سختی سطحی و تنش پسماند در ورق‌های آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 که به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و با سرعت‌های دورانی و پیشروی متفاوت ابزار، به صورت لب به لب به یکدیگر متصل شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این که آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 دارای قابلیت عملیات حرارتی است، نتایج آزمون سختی نمونه‌ها نشان می‌دهد افزایش سرعت دورانی و یا کاهش سرعت پیشروی ابزار، سختی را در ناحیه جوشکاری، کاهش می‌دهد. با استفاده از روش استاندارد پراش اشعه ایکس، که یک روش غیر مخرب است، تنش‌های پسماند در نمونه‌های جوشکاری شده، اندازه‌گیری شده است. شبیه‌سازی اجزا محدود فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با روش مدل حرارتی و محاسبه حرارت تولیدی در حین جوشکاری، در نرم افزار آباکوس انجام گرفته است. مقایسه مقادیر تنش‌های پسماند حاصل از حل عددی با اندازه‌گیری‌های تجربی نشان می‌دهد، مدل عددی می‌تواند پیش‌بینی قابل قبولی از میدان تنش پسماند در اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارائه دهد.

بررسی نتایج تنش‌های پسماند نشان می‌دهد، با افزایش سرعت دورانی و پیشروی ابزار، مقادیر تنش در ناحیه جوشکاری شده افزایش می‌یابد؛ که علت آن بالا رفتن گرادیان حرارتی در اثر افزایش سرعت دورانی، و کاهش افت سختی و مقاومت بیش‌تر در برابر تغییر شکل پلاستیک با افزایش سرعت پیشروی ابزار است.

Tool's Speed effect on hardness and residual stress in friction stir welded Al 2024-T351: Experimental method and Numerical simulation

Danial Ghahremani Moghadam[1], Khalil Farhang Doost[1*], Ali Rastegar[1], Mohammad Ramezani Moghaddam[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 91779-48974 Mashhad, Iran, farhang@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 November 2014
Accepted 22 November 2014
Available Online 20 December 2014

Keywords:
Friction Stir Welding
Residual Stress
X-Ray Diffraction
Finite Element Method
Aluminum Alloy 2024-T351

ABSTRACT

In this study, microstructure, microhardness and residual stress in the butt jointed friction stir welded aluminum alloy 2024-T351 plates with different tool's rotational and traverse speed is studied. According to the 2024-T351 aluminum is a heat treatable alloy, Hardness test results showed that increasing rotational speed or decreasing traverse speed of the tool reduced hardness in the weld zone. Then, using standard X-ray diffraction, which is a non-destructive method, residual stress in the welded samples is determined.A thermal model of friction stir welding process is simulated by using finite element method in the ABAQUS software. Comparison of residual stress results that obtained from the numerical solution with experimental measurements show that, the numerical model can predict the residual stress fields in friction stir welding joints reasonably.

The results show that, increasing rotational speed, cause to higher residual stress in the weld zone, due to generation the higher thermal gradient and also, The higher tool traverse speed will induce a greater high-stress zone with a higher stress value in the weld, because of, a lower heat input and result in the relatively harder metal in the weld zone, causes a greater resistance to the plastic extrusion.

1- مقدمه

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[1] که در سال 1991 در مؤسسه جوشکاری انگلستان[2] ابداع شد [1]، در سال‌های اخیر به عنوان یک روش بسیار مناسب نسبت به جوشکاری‌های سنتی برای اتصال سازه‌های آلومینیومی مطرح شده است. در این فرایند ابتدا یک پین دوار وارد ناحیه اتصال لبه دو ورق

1- Friction Stir Welding (FSW)

2- The Welding Institute (TWI)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

D. Ghahremani Moghadam, Kh. Farhang Doost, A. Rastegar, M. Ramezani Moghaddam, Tool's Speed effect on hardness and residual stress in friction stir welded Al 2024-T351: Experimental method and Numerical simulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 61-71, 2015 (In Persian)

آلومینیومی شده و سپس در راستای خط اتصال حرکت می‌کند. شکل 1 تصویر شماتیک فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد. حرارت حاصل از اصطکاک بین ابزار و ورق، و همچنین حرارت حاصل از انجام کار خمیری، باعث نرم و متلاطم شدن مواد اطراف ابزار شده، به طوری که هیچ گونه ماده مذابی در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مشاهده نمی‌گردد. چرخش ابزار باعث جاری شدن و ترکیب مواد با یکدیگر می‌شود. کرنش بالا و انرژی حرارتی منتقل شده به فلز پایه در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باعث تغییر ساختار کریستالی و دانه‌بندی در ناحیه جوشکاری خواهد شد.

مطالعات بسیاری در جهت شناخت مکانیک فرایند [3]، جریان ماده [4]، ویژگی‌های متالوژیکی [5،6] و خواص خستگی و شکست [7] در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است. همچنین در مورد اتصال فلزات غیر-همجنس به وسیله این روش تحقیقات زیادی انجام شده که از آن جمله می-توان اتصال آلیاژ آلومینیوم به فولاد آستنیتی را نام برد [8]. برخی تحقیقات دیگر، تنش پسماند را مورد بررسی قرار داده‌اند. پیل و همکاران [9] تأثیر سرعت حرکت ابزار را بر تنش‌های پسماند با استفاده از روش پراش اشعه ایکس[1] بررسی کردند. استارون و همکاران [10] و پریوی [11] با استفاده از یک روش تست غیر مخرب، تنش‌های پسماند را در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب به لب محاسبه کرده و امکان تغییر حالت تنش‌های پسماند را با اعمال کشش مکانیکی خارجی، در حین فرایند جوشکاری بررسی نمودند. فراتینی و همکاران [12] به روش سوراخ‌کاری عمیق[2] منحنی تنش پسماند را برای آلیاژهای آلومینیوم 6082-T6، 7075-T6 و 2024-T4 استخراج کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که تنش پسماند مقاومت خستگی اتصالات جوشکاری را بهبود می‌دهد [13]. علاوه بر روش‌های تجربی، مدل‌های عددی به طور گسترده برای تعیین تنش پسماند در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. چائو و همکاران [14] برای فولاد، چن و کواچویک [15] و رینولدز و همکاران [16] برای آلیاژهای آلومینیوم با استفاده از تحلیل‌های حرارتی متفاوت، تنش‌های پسماند را در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شبیه‌سازی نمودند.

تأثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر تنش‌های پسماند، با استفاده از روش‌های عددی و تجربی، در مطالعات اخیر کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه، سرعت دورانی و سرعت پیشروی و میزان نفوذ ابزار

شکل 1 تصویر شماتیک فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [2]

1- X-Ray Diffraction
2- Deep Hole Drilling

[17،3]، همچنین نیروی فورج و نیروی گیره‌بندی [18]، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر رفتار مکانیکی، الگوی جریان مواد و توزیع دما هستند. در بین این پارامترها، سرعت دورانی و پیشروی ابزار، تأثیر زیادی در مقادیر تنش پسماند در اتصالات جوشکاری شده دارند. با بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری، می‌توان مقدار مناسب این پارامترها را برای رسیدن به حالت تنش پسماند معین، مشخص کرد.

در این تحقیق، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 که کاربرد فراوانی در صنایع هوافضا دارد، انجام شده است. ساختار میکروسکوپی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته و منحنی سختی سطحی برای تعدادی از آن‌ها بدست آمده است. پس از آن با استفاده از روش غیر مخرب پراش اشعه ایکس، تنش پسماند طولی[3] در چند نقطه از سطح نمونه در راستای عمود بر خط جوش بدست آمده است. شبیه‌سازی عددی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس[4] 6.13، به روش حرارتی، انجام شده و منحنی تنش پسماند به ازای سرعت‌های دورانی و پیشروی متفاوت ابزار، استخراج شده است. مقایسه نتایج تجربی و عددی برای تنش‌های پسماند در سرعت‌های جوشکاری متفاوت، تطابق خوبی را بین آن‌ها نشان می‌دهد.

2- روش آزمایش

2-1- فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

ورق‌های مورد استفاده برای جوشکاری، از جنس آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 به ضخامت 8 میلی‌متر و ابعاد 120×35 میلی‌متر می‌باشند. درصد عناصر تشکیل دهنده و خواص مکانیکی این آلیاژ به ترتیب در جدول‌های 1 و 2 آمده است.

برای جوشکاری ورق‌ها از ابزار نشان داده شده در شکل 2 از جنس آلیاژ فولاد spk2436 با سختی 50 راکول[5] (HRC) استفاده شده است، که مشخصات هندسی آن بر روی شکل آمده است.

جدول 1 درصد عناصر تشکیل دهنده آلیاژ آلومینیوم 2024-T351

Zn	Si	Mn	Mg	Fe	Cu	Al
0/12	0/11	0/72	1/53	0/29	4/45	Base

جدول 2 خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351

مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	سختی ویکرز	تنش نهایی کششی (MPa)	تنش تسلیم کششی (MPa)
77/5	0/31	137	429	324

شکل 2 الف) ابزار جوشکاری، ب) مشخصات هندسی ابزار جوشکاری (ابعاد به mm)

3- Longitudinal Residual Stress
4- ABAQUS
5- Rockwell

جوشکاری با یک دستگاه فرز یونیورسال MP4، 2 تن، انجام شده است. ابتدا دو ورق آلومینیومی در امتداد لبه طولی در کنار یکدیگر قرار گرفته و سپس در داخل گیره‌ها مقید می‌شوند. همچنین از یک ورق فولادی به عنوان صفحه نگه‌دارنده زیرین استفاده شده است.

ابزار با زاویه کجی[1] 2 درجه نسبت به راستای عمود بر سطح ورق‌ها، در دستگاه فرز بسته شده است. شانه ابزار باید با سطح قطعه کار تماس داشته باشد و حتی تا اندازه‌ای در درز جوش نفوذ کند. حین تماس ابزار با قطعه کار، حرارت اصطکاکی ایجاد می‌شود؛ این حرارت، با حرارت تولید شده حاصل از تداخل مکانیکی فرایند و حرارت آدیاباتیکی درون قطعه کار ترکیب شده و موجب می‌شود تا مواد متلاطم شده، بدون رسیدن به نقطه ذوب نرم شوند؛ بنابراین حرکت انتقالی ابزار در خط جوش، درون ناحیه مومسان گردابی فلز ممکن می‌شود. دوران و هندسه خاص ابزار مواد مومسان را به پشت پین می‌فرستد و با انتقال مواد از یک سمت به سمت دیگر، عمل ترکیب مواد تکمیل می‌شود. همزمان نیروی اصلی موجود، یعنی نیروی کله‌گی یا نیروی فورج، بر این مواد اعمال می‌شود و جوشکاری مواد توسط تغییر شکل پلاستیکی شدید[2] در حالت جامد، که شامل تبلور مجدد دینامیکی[3] فلز پایه است، ممکن شده و یک اتصال متالوژیکی محکم شکل خواهد گرفت و در نهایت جوش ایجاد می‌شود [3]. شکل 3 مجموعه آماده‌سازی شده جهت انجام جوشکاری، یک نمونه بسته شده در گیره‌ها و نمونه جوشکاری شده را پس از اتمام فرایند نشان می‌دهد.

جوشکاری ورق‌ها با سرعت‌های دورانی و پیشروی مختلف ابزار انجام شده که مقادیر این سرعت‌ها در جدول 3 آمده است. با توجه به جنس و ضخامت نمونه‌ها، برای سرعت‌های دورانی کمتر از 400rpm، به دلیل عدم ایجاد حرارت کافی، نمونه‌های جوشکاری شده مناسبی بدست نمی‌آید، همچنین در سرعت‌های دورانی بالاتر از 800rpm سطح نمونه‌های جوشکاری شده به دلیل سرعت بالای ابزار معمولا ناهموار و به صورت پوسته‌ای است. شکل 4 سطح نامناسب یک نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی 1200rpm و پیشروی $31/5 mm.min^{-1}$ و مقطع دارای حفره آن را نشان می‌دهد. با توجه به قابلیت دستگاه فرز، با انتخاب چندین سرعت دورانی در بازه 400rpm تا 800rpm، و با انجام جوشکاری‌های متعدد، سرعت‌های پیشروی ابزار به گونه‌ای انتخاب شده‌اند، تا نمونه‌های جوشکاری شده مناسب و با کمترین عیوب بدست آید. علاوه بر سرعت پیشروی و دورانی، سایر پارامترهای جوشکاری، مانند عمق نفوذ ابزار و شکل پین، پس از انجام جوش‌های متفاوت به گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا حرارت و در نتیجه ناحیه خمیری مناسبی در حین فرایند ایجاد شده و حفره و ترک در مقطع ناحیه جوش به وجود نیاید. مقادیر این پارامترها برای تمامی نمونه‌های جدول 3 ثابت در نظر گرفته شده است. با توجه به عمق نفوذ ثابت 0/3 میلی‌متر، و سرعت‌های دورانی و پیشروی متفاوت ابزار، مقادیر نیروی فورج در نمونه‌های جوشکاری شده، با یکدیگر متفاوت است. مقدار این نیرو با استفاده از یک نیروسنج که در زیر گیره دستگاه فرز نصب شده است، در طی فرایند جوشکاری اندازه‌گیری می‌شود. مقادیر نیروی فورج برای نمونه 1 در طی فرایند جوشکاری در شکل 5 نشان داده شده است. با توجه به شکل 5 می‌توان دریافت، نیروی فورج در طی فرایند جوشکاری تقریباً دارای مقدار ثابتی است، برخی تحقیقات نیز ثابت بودن این نیرو را در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نشان می‌دهند [20،19]. مقادیر نیروی فورج برای تعدادی از نمونه ها در جدول 4 آمده است.

(الف)

(ب)

(ج)

شکل 3 الف) مجموعه آماده‌سازی شده جهت انجام جوشکاری، ب) ورق‌های در حال جوشکاری، ج) یک نمونه ورق جوشکاری شده

جدول 3 سرعت‌های دورانی و پیشروی متفاوت ابزار در نمونه‌های جوشکاری

نمونه	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی ($mm.min^{-1}$)	نمونه	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی ($mm.min^{-1}$)
1	400	8	10	500	31/5
2	400	16	11	630	16
3	400	20	12	630	20
4	400	25	13	630	25
5	400	31/5	14	630	31/5
6	500	8	15	800	16
7	500	16	16	800	20
8	500	20	17	800	25
9	500	25	18	800	31/5

1- Tilt Angle
2- Sever Plastic Deformation
3- Dynamic Recrystallization

(الف)

(ب)

شکل 4 الف) سطح نامناسب نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی 1200rpm و پیشروی $31/5\ mm.min^{-1}$، ب) مقطع دارای حفره

شکل 5 مقادیر نیروی فورج بر حسب زمان برای نمونه 1 در طی فرایند جوشکاری

جدول 4 مقادیر نیروی فورج برای تعدادی از نمونه ها

شماره نمونه	نیروی فورج (kg)
1	620
6	678
7	720
11	680
12	750

2-2- تعیین ریزساختار و سختی

به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌های جوشکاری شده در مقطع عمود بر منطقه جوش، با استفاده از روش استاندارد متالوگرافی ASTM E3-01 [21]، نمونه‌های متالوگرافی آماده‌سازی شده، سپس توسط میکروسکوپ نوری تحت بررسی قرار گرفته‌اند. برای آشکارسازی ساختار نمونه‌ها از محلول کلر[1] با ترکیب شیمیایی $95\%H_2O$، $2.5\%HNO_3$، $1.5\%HCl$ و $1\%HF$ استفاده شده است. شکل 6 یک نمونه آماده شده را نشان می‌دهد.

سختی سطحی نمونه‌های جوشکاری شده در نقاط متفاوت از مقطع جوش، با استفاده از استاندارد ASTM E384 [22]، به روش میکروویکرز با نیروی 50 گرم و با فرو رونده هرم الماسه در مدت زمان 15 ثانیه انجام شده است.

1- Keller

شکل 6 یک نمونه آماده شده برای آزمایش متالوگرافی

2-3- روش تعیین تنش پسماند با استفاده از پراش اشعه ایکس

2-3-1- تئوری روش استاندارد پراش اشعه ایکس

رابطه اساسی در روش استاندارد پراش اشعه ایکس، قانون براگ[2] [23] می‌باشد، که در رابطه (1) آمده است.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \qquad (1)$$

در این رابطه، n مرتبه انعکاس، λ طول موج اشعه ایکس، d فاصله بین صفحات کریستالی و θ زاویه انعکاس (زاویه براگ) است.

در این روش اشعه ایکس به سمت نمونه تابیده، و اشعه منعکس شده در جایی که دارای بیش‌ترین شدت است دریافت می‌شود. پرتوی اشعه ایکس تک‌فام که به وسیله آند فلزی تیوب‌های اشعه ایکس تولید می‌شود، دارای طول موج مشخصی است و هر تغییری در فاصله صفحات کریستالی، d، منجر به جابجایی زاویه انعکاس می‌شود. آند تیوب‌های اشعه ایکس، یک طیف پیوسته و سه پرتو پر انرژی تک‌فام، $k\beta$، $k\alpha_2$ و $k\alpha_1$ تولید می‌کند. انتخاب یک پیک انعکاسی که برای تعیین تنش پسماند مناسب باشد، تأثیر بسزایی بر دقت این روش دارد. در تحلیل تنش پسماند از زاویه انعکاس بالاتر از 120 درجه استفاده می‌شود؛ زیرا در این زاویه‌ها، پیک‌ها شدت و دقت بالاتری دارند و از طرفی در زاویه انعکاس بالا، پرتوی $k\beta$ از پرتوهای $k\alpha_2$ و $k\alpha_1$ فاصله گرفته و تأثیری در پیک انعکاس ندارد و در نتیجه نیازی به استفاده از فیلتر برای حذف آن نمی‌باشد. هر چه تنش پسماند در ماده بیش‌تر باشد، پیک پهن‌تر خواهد بود [24]. شکل 7 تأثیر میزان تنش پسماند را بر پیک‌های اشعه ایکس نشان می‌دهد.

بعد از تقریب پیک اشعه ایکس منعکس شده و تعیین موقعیت دقیق نوک پیک در هر زاویه مشخص ψ، تنش پسماند در زاویه دلخواه ϕ محاسبه می‌شود. پیک منعکس شده از جسمی که دارای شبکه کریستالی منظم و سالم بوده و هیچ تنش پسماندی در آن وجود ندارد، در یک زاویه براگ مشخص 2θ ایجاد می‌شود. در صورت وجود تنش پسماند در ماده، پیک منحنی پراش به ازای چرخش نمونه در زوایای متفاوت ψ، در موقعیت‌های زاویه‌ای متفاوت 2θ ایجاد می‌شود. شکل 8 تأثیر وجود تنش پسماند را بر جابجایی پیک منحنی پراش به ازای چرخش نمونه در زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد.

به دلیل محدودیت عمق نفوذ اشعه ایکس در ماده، اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس، محدود به سطح نمونه است. برای اندازه‌گیری تنش پسماند در یک سطح مشخص، فرض می‌شود شرط تنش صفحه‌ای برقرار باشد. با استفاده از روابط الاستیسیته و اعمال شرط تنش صفحه‌ای (شکل 9)، رابطه (2) برای تعیین تنش پسماند در جهت دلخواه ϕ به دست می‌آید [25].

2- Bragg's law

شکل 7 تأثیر تنش پسماند بر بازشدگی پیک [24]

شکل 8 تأثیر تنش پسماند بر جابجایی پیک، در زاویه‌های متفاوت ψ

شکل 9 شرایط تنش صفحه‌ای و نمایش زوایای ϕ و ψ در پراش اشعه ایکس [25]

$$\sigma_\phi = \frac{E}{d_{\phi_0}(1+\nu)} \cdot \frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2\psi} \qquad (2)$$

که در آن، E مدول الاستیسیته، ν ضریب پواسون، d_{ϕ_0} فاصله بین صفحات کریستالی در زاویه $\psi = 0$ و $d_{\phi\psi}$ فاصله بین صفحات کریستالی در زاویه دلخواه ϕ و ψ می‌باشد.

2-3-2- آزمایش پراش اشعه ایکس بر روی نمونه‌های جوشکاری شده

برای آزمایش تعیین تنش پسماند، ابتدا سطح مورد نظر برای اندازه‌گیری تنش، تحت آنالیز طیفی، از زاویه حدود 0 تا 150 درجه قرار می‌گیرد. هدف از این آنالیز آگاهی از کیفیت و کمیت پیک‌ها است و در صورتی که پیک‌ها شدت و دقت کافی داشته باشند، اندازه‌گیری تنش پسماند انجام می‌شود. در شکل 10 آنالیز طیفی از سطح قطعه خام و نمونه جوشکاری شده 1 نشان داده شده است.

زاویه اسکن 2θ برای نمونه‌ها از 133/8 تا 140/8 درجه بوده، و مقادیری که برای زاویه ψ در نظر گرفته شده به گونه‌ای است که مجذور سینوس زاویه آن دارای گام 0/1 باشد. پس از آنالیز طیفی برای نمونه 18، در سطحی به ابعاد 5×5 میلی‌متر، که مرکز سطح در فاصله 20 میلی‌متری از خط جوش قرار دارد، شکل 11 و جدول 5 نشان می‌دهند که وجود تنش پسماند باعث جابجایی پیک به ازای چرخش نمونه در زاویه‌های کجی، ψ، مختلف شده است. در هر یک از این زاویه‌ها شدت پیک منعکس شده نیز با یکدیگر متفاوت است.

پس از تعیین شیب نمودار $d - \sin^2\psi$ که در شکل 12 نشان داده شده است، تنش پسماند در سطح مورد نظر تعیین می‌شود. شکل 13 دستگاه پراش اشعه ایکس، برای تعیین تنش پسماند را نشان می‌دهد. برخی جزئیات مربوط به دستگاه اندازه‌گیری تنش پسماند در جدول 6 آمده است.

شکل 10 آنالیز طیفی از سطح الف) قطعه خام، ب) نمونه جوشکاری 1

شکل 11 منحنی‌های پراش در زوایای متفاوت ψ برای نمونه 18 (800 rpm, 31.5 mm/min)

جدول 5 موقعیت پیک‌ها و فاصله صفحات در زاویه‌های متفاوت کجی برای نمونه 18

شماره	ψ (°)	$\sin^2\psi$	موقعیت پیک 2θ (°)	$d = \frac{\lambda}{2\sin\theta}$ (Å)
1	0/000	0/0000	137/286	0/827097
2	-18/435	0/1000	137/301	0/827055
3	-26/565	0/2000	137/318	0/827007
4	-33/211	0/3000	137/337	0/826953
5	-39/232	0/4000	137/363	0/826880
6	-45/000	0/5000	137/403	0/826768
7	-50/768	0/6000	137/463	0/826599

شکل 12 نمودار $d - sin^2\psi$ برای نمونه 18

شکل 13 دستگاه پراش اشعه ایکس برای اندازه‌گیری تنش پسماند

جدول 6 مشخصات دستگاه اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس و شرایط آزمایش برای تمام نمونه‌ها

طول موج پرتو $k\alpha_1$	1/54056 [Å]
طول موج پرتو $k\alpha_2$	1/54439 [Å]
آند تیوب	مس
مشخصات ژنراتور	40 KV و 40 A
نحوه تابش پرتو اشعه ایکس	پیوسته
زاویه شروع آنالیز (2θ)	133/794 [deg.]
زاویه پایان آنالیز (2θ)	140/806 [deg.]
اندازه هر مرحله (2θ)	0/02626 [deg.]
زمان هر مرحله	2 sec
تعداد پیک‌ها	7

3- شبیه‌سازی عددی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

3-1- محاسبه حرارت تولیدی در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

شبیه‌سازی عددی در این تحقیق به شیوه حرارتی انجام گرفته است. بدین منظور ابتدا باید مقدار حرارت تولید شده در تماس ابزار با قطعه کار در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تعیین شود.

در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، حرارت در نزدیک سطح تماس ابزار و قطعه کار تولید می‌شود. برای محاسبه حرارت، پین ابزار به صورت استوانه و شانه ابزار به صورت شیب‌دار با زاویه α به سمت داخل در نظر گرفته شده است. برای شانه تخت مقدار α صفر فرض می‌شود. شکل 14 مدل ساده شده ابزار را برای محاسبه حرارت نشان می‌دهد. $R_{shoulder}$، شعاع شانه ابزار، R_{probe} و H_{probe} به ترتیب، شعاع و ارتفاع پین ابزار می‌باشند. با توجه به شکل 14، Q_1، حرارت تولید شده در شانه، Q_2، حرارت سطح جانبی پین و Q_3، حرارت سطح زیرین پین در نظر گرفته شده است. بنابراین کل حرارت تولید شده $Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3$ خواهد بود. حرارت تولید شده در هر یک از سطوح تماس با استفاده از رابطه (3) محاسبه می‌شود [26].

$$dQ = \omega dM = \omega r dF = \omega r \tau_{contact} dA \quad (3)$$

در رابطه (3)، ω سرعت زاویه‌ای ابزار، M گشتاور، F نیرو، A سطح تماس و r فاصله از محور دوران پین در مختصات استوانه‌ای می‌باشد. شکل 15 سطوح تماس شانه و پین ابزار را در مختصات استوانه‌ای نشان می‌دهد.

با استفاده از رابطه (3)، حرارت تولیدی از شانه ابزار، Q_1، به صورت رابطه (4) نوشته می‌شود.

$$Q_1 = \int_0^{2\pi}\int_{R_{probe}}^{R_{shoulder}} \omega\tau_{contact} r^2 (1+\tan\alpha) dr d\theta = \frac{3}{2}\pi\omega\tau_{contact}\left(R_{shoulder}^3 - R_{probe}^3\right)(1+\tan\alpha) \quad (4)$$

حرارت تولید شده در پین شامل دو قسمت، Q_2 از سطح جانبی و Q_3 از سطح نوک پین است. با انتگرال‌گیری از رابطه (3) بر روی سطح جانبی پین می‌توان مقدار Q_2 را مطابق رابطه (5) محاسبه نمود.

$$Q_2 = \int_0^{2\pi}\int_0^{H_{probe}} \omega\tau_{contact} R_{probe}^2 dz d\theta = 2\pi\omega\tau_{contact} R_{probe}^2 H_{probe} \quad (5)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه (3) بر روی سطح تخت نوک پین، مقدار Q_3 محاسبه می‌شود که در رابطه (6) آمده است.

$$Q_3 = \int_0^{2\pi}\int_0^{R_{probe}} \omega\tau_{contact} r^2 dr d\theta = \frac{2}{3}\pi\omega\tau_{contact} R_{probe}^3 \quad (6)$$

بنابراین، کل حرارت تولید شده به صورت رابطه (7) بدست می‌آید [26].

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \frac{2}{3}\pi\omega\tau_{contact}\left(\left(R_{shoulder}^3 - R_{probe}^3\right)(1+\tan\alpha) + R_{probe}^3 + 3R_{probe}^2 H_{probe}\right) \quad (7)$$

در این تحقیق، مقدار R_{probe}، برابر با میانگین شعاع پین مخروطی ابزار، و سایر پارامترهای هندسی مطابق شکل 2- ب در نظر گرفته شده است. همچنین، مشابه برخی تحقیقات دیگر با توجه به کمتر بودن تنش برشی ناشی از اصطکاک $(\tau_{friction})$، نسبت به تنش تسلیم برشی ماده (τ_{yield})، از چسبندگی ماده به قطعه کار و حرارت تولیدی ناشی از آن صرف‌نظر شده، و بین سطح ابزار و قطعه کار شرایط لغزش در نظر گرفته شده است [29،26]. مقدار تنش تسلیم برشی ماده از رابطه (8) بدست می‌آید.

شکل 14 حرارت تولید شده توسط قسمت‌های مختلف ابزار جوشکاری [27]

شکل 15 سطوح انتقال حرارت ابزار در مختصات استوانه‌ای الف) سطح زاویه‌دار شانه ابزار، ب) سطح جانبی پین، ج) سطح زیرین پین [28]

$$\tau_{yield} = \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

بنابراین با توجه به توضیحات داده شده مقدار $\tau_{contact}$ در رابطه (7) با استفاده از قانون اصطکاک کلمب، به صورت رابطه (9)، تعیین می‌شود.

$$\tau_{contact} = \tau_{friction} = \mu p \quad (9)$$

که در آن، μ ضریب اصطکاک بین سطوح تماس و p فشار فورج است.

3-2- شبیه‌سازی حرارتی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در نرم‌افزار

شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار آباکوس 13. 6 و به شیوه حرارتی انجام شده است. برای جوشکاری، صفحه‌ای به ابعاد 120×70 میلی‌متر و ضخامت 8 میلی‌متر و با المان‌های مربعی هشت گره‌ای C3D8T مدل شده است. شکل 16 صفحه شبکه‌بندی شده را نشان می‌دهد.

سرعت‌های دورانی و پیشروی ابزار مطابق جدول 3 در نظر گرفته شده‌اند. برای تعریف خواص مواد، مدل جانسون-کوک[1] [30]، که در رابطه (10) نشان داده شده، به کار رفته است. مقدار ضرایب رابطه (10) و خواص حرارتی برای آلیاژ آلومینیوم 2024-T351، به ترتیب، در جدول‌های 7 و 8 آمده است.

$$\sigma_y = \left[A + B(\varepsilon_p)^n\right]\left[1 + Cln\left(\frac{\dot{\varepsilon_p}}{\dot{\varepsilon_0}}\right)\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m\right] \quad (10)$$

در رابطه (10)، ε_p کرنش پلاستیک، $\dot{\varepsilon_p}$ نرخ کرنش پلاستیک، T دمای ماده، T_{melt} دمای نقطه ذوب ماده، σ_y تنش در دمای T هستند، و سایر پارامترها در جدول 7 آمده است. مقدار ضریب اصطکاک در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تابع دما است که تغییرات آن در بازه (0/5- 0/3) است، در این تحقیق با انجام چندین مدل‌سازی با ضرایب اصطکاک متفاوت، و مقایسه مقادیر تنش‌های پسماند عددی با مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده، مقدار ضریب اصطکاک برای تمام نمونه‌ها ثابت و برابر 0/4 در نظر گرفته شده است [31،29]. فشار فورج از تقسیم نیروی فورج بر سطح مقطع ابزار محاسبه می‌شود که مقادیر نیروی فورج در بخش 1-2 به روش تجربی بدست آمده است. شکل 17 توزیع دما را در حین فرایند جوشکاری برای نمونه 1، در زمان‌های متفاوت، نشان می‌دهد.

تغییرات بیشینه دما برای نمونه‌های 1، 2 و 6 در شکل 18 نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان دریافت با افزایش سرعت پیشروی، بیشینه دما کاهش یافته و با افزایش سرعت دورانی، بیشینه دما افزایش می‌یابد.

پس از اتمام فرایند، ورق جوشکاری شده با استفاده از روش تغییر مدل[2]

شکل 16 صفحه شبکه‌بندی شده

جدول 7 مقادیر ضرایب رابطه جانسون-کوک برای آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 [30]

دمای مرجع، T_{room}	20 ℃
تنش تسلیم، A	324 MPa
ضریب کرنش، B	426 MPa
نمای کرنش، n	0/34
نمای دما، m	1
ضریب نرخ کرنش، C	0/015
نرخ کرنش اولیه، $\dot{\varepsilon}_0$	1

جدول 8 خواص حرارتی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 [32]

نقطه ذوب (℃)	ظرفیت حرارتی مخصوص ($Jg^{-1}℃^{-1}$)	ضریب هدایت حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
502	0/875	121

(الف) (ب) (ج)

شکل 17 توزیع دما (بر حسب ℃) در فرآیند جوشکاری برای نمونه 1؛ الف) ابتدای زمان جوشکاری، ب) میانه زمان جوشکاری، ج) انتهای زمان جوشکاری

1- Johnson-Cook

2- Model Change

در نرم‌افزار آباکوس به صورت ورقی با ابعاد 60×62/5 میلی‌متر و ضخامت 6 میلی‌متر در آمده است. شکل 19 میدان تنش پسماند در نمونه 1، پس از سرد شدن و تغییر ابعاد را نشان می‌دهد. علت انتخاب ابعاد فوق برای نمونه مدل‌سازی عددی، مطابقت آن با نمونه استاندارد تجربی آماده شده، است.

علت کاهش ضخامت نمونه جوشکاری شده تجربی، از 8 میلی‌متر به 6 میلی‌متر، حذف ناهمواری‌های سطحی جهت انجام آزمایش پراش اشعه ایکس، می‌باشد.

4- تحلیل نتایج

4-1- مشخصات ریزساختاری

در شکل 20 تصاویر میکروسکوپی از نواحی متفاوت مقطع نمونه جوشکاری شده، نشان داده شده است. با توجه به تصاویر میکروسکوپی و ویژگی‌های ساختاری دانه‌ها، سه ناحیه متفاوت در تمام نمونه‌های جوشکاری دیده می‌شود؛ ناحیه متلاطم[1]، ناحیه متأثر ترمومکانیکی[2] و ناحیه متأثر از حرارت[3].

(الف)

(ب)

شکل 18 تغییرات بیشینه دما در فرایند شبیه‌سازی برای نمونه‌های 1، 2 و 6؛ الف) مقایسه دمای بیشینه در طی فرایند جوشکاری، ب) مقایسه توزیع دمای بیشینه در امتداد عمود بر خط جوش

شکل 19 میدان تنش پسماند (Pa) در نمونه 1، پس از سرد شدن و تغییر ابعاد

1- Nugget
2- ThermoMechanical Affected Zone (TMAZ)
3- Heat Affected Zone (HAZ)

در ناحیه متلاطم که درونی‌ترین ناحیه جوش، و ناحیه اشغال شده توسط پین در حین جوشکاری است، مواد به طور کامل در معرض شدیدترین تغییر شکل پلاستیک و شرایط دمایی قرار گرفته‌اند. از این رو ساختار دانه‌ها در این ناحیه بسیار ریز است و تقریباً تمام دانه‌ها هم‌محور[4] بوده و اندازه آن‌ها کوچک‌تر از دانه‌های فلز پایه می‌باشد. در اطراف ناحیه متلاطم، ناحیه متأثر ترمومکانیکی با ریزساختار متفاوتی وجود دارد. مشخصات ماده و ریزساختار آن، هم‌زمان تحت اثر حرارت و کار مکانیکی قرار می‌گیرد. در این ناحیه نسبت به منطقه متلاطم، کرنش و دما کمتر بوده، و تأثیر جوشکاری بر ریزساختار کمتر است.

ساختار این ناحیه از ماده اولیه قابل تشخیص بوده، و به خوبی اثرات تغییر شکل و دوران در آن مشهود است. به دلیل عدم تأمین انرژی لازم، در این ناحیه تبلور مجدد رخ نمی‌دهد. ساختار دانه‌های کشیده شده و دوران یافته مربوط به ناحیه متأثر ترمومکانیکی در شکل 20- ب دیده می‌شود. در اطراف ناحیه متأثر ترمومکانیکی، ناحیه متأثر حرارتی وجود دارد که ماده در این ناحیه تحت تأثیر حرارت، بدون تغییر فرم پلاستیک درحین جوشکاری قرار گرفته است. تغییرات ریز ساختار در این ناحیه نسبت به دو ناحیه دیگر کمتر است.

(الف)

(ب)

(ج)

شکل 20 تصاویر میکروسکوپی از مقطع ناحیه جوشکاری شده برای نمونه 1؛ الف) تصویر ماکروگرافی مقطع ناحیه جوش، ب) ناحیه متأثر ترمومکانیکی با بزرگنمایی 50 برابر، ج) ریزدانه‌ها و ساختار ناحیه متلاطم با بزرگنمایی 200 برابر

4- Equiaxed

4-2- سختی

تحقیقات نشان می‌دهد، تغییر سختی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای آلیاژهای آلومینیوم که قابلیت عملیات حرارتی دارند، با آلیاژهای بدون قابلیت عملیات حرارتی متفاوت است. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای برخی از آلیاژهای آلومینیوم با قابلیت عملیات حرارتی، ناحیه وسط مقطع جوشکاری شده سختی کمتری نسبت به سایر نواحی دارد [9]. همچنین مقدار سختی در نواحی پسین و پیشین اتصال مقداری با یکدیگر متفاوت است، در این آلیاژها مقدار سختی در قسمت پسین اتصال نسبت به ناحیه پیشین اندکی بیشتر است [33]. در این تحقیق، سختی ویکرز برای تعدادی از نمونه‌ها در مقطع ناحیه جوشکاری برای ناحیه پسین اتصال تعیین شده است. نتایج آزمایش سختی برای نمونه‌های 1، 2 و 6 در شکل 21 آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی در وسط مقطع جوشکاری، یعنی ناحیه متلاطم، نسبت به فلز پایه کمتر است. با توجه به نتایج آزمایش‌های متالوگرافی، ساختار دانه‌ها در منطقه متأثر حرارتی نسبت به سایر نواحی جوشکاری شده منظم‌تر می‌باشد، بنابراین مقدار سختی در این ناحیه نسبت به سایر نواحی بالاتر است.

عامل اصلی افزایش سختی در آلیاژ آلومینیوم 2024، تشکیل رسوب‌های بسیار ریز Al_2CuMg یا S در زمینه آلیاژ است [34]. با اعمال حرارت نسبتاً بالا در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، این رسوب‌ها یا در زمینه حل شده و یا درشت می‌شوند؛ در نتیجه سختی در منطقه حرارت دیده کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل 18 نشان داده شد، با افزایش سرعت پیشروی، دمای بیشینه کاهش می‌یابد؛ در نتیجه انحلال و یا درشت شدن رسوب‌های استحکام دهنده کمتر می‌شود و به عبارت دیگر، شدت پدیده فراپیر شدن[1] کاهش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود سختی در منطقه متلاطم و اطراف آن، با افزایش سرعت پیشروی، افت کمتری داشته باشد؛ یعنی در یک سرعت دورانی ثابت، نمونه‌ای که با سرعت پیشروی بالاتری جوشکاری شده است، سختی بالاتری دارد. علاوه بر آن، با افزایش سرعت دورانی، در یک سرعت پیشروی ثابت، دمای بیشینه افزایش می‌یابد؛ بنابراین افت سختی نیز افزایش خواهد یافت. در شکل 21 می‌توان تأثیر تغییرات سرعت پیشروی و دورانی بر سختی را مشاهده نمود.

4-3- تنش‌های پسماند تجربی و عددی

تنش‌های پسماند تجربی با استفاده از روش استاندارد پراش اشعه ایکس که

شکل 21 مقادیر سختی ویکرز برای نمونه‌های 1، 2 و 6

در بخش 4-2 ارائه شد، محاسبه شده‌اند. تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده دارای عدم قطعیتی به مقدار تقریبی ± 8 MPa هستند که در نتیجه عواملی مانند عدم صافی سطح نمونه، تقریب خط مستقیم برای داده‌های بدست آمده از نمودار $d-\sin^2\psi$، میزان دقت تعیین موقعیت پیک‌های منعکس شده (2θ)، محدودیت در تعداد مراحل اندازه‌گیری تنش پسماند در زاویه‌های مختلف کجی نمونه (ψ)، میزان دقت تعیین خواص مکانیکی مانند مدول الاستیسیته و ضریب پواسون و خطاهای کاربر می‌باشد.

تنش‌های پسماند طولی، در امتداد عمود بر خط جوش در چند ناحیه به ابعاد 5×5 میلی‌متر اندازه‌گیری شده‌اند. در شکل 22، برای نمونه‌های 1، 13 و 18، تنش‌های پسماند حاصل از شبیه‌سازی عددی، با مقادیر تجربی محاسبه شده از آزمایش، مقایسه شده‌اند.

اختلاف بین نتایج عددی و تجربی برای تنش پسماند حدود 20% است. خطاهای موجود در اندازه‌گیری‌های تجربی، ثابت گرفتن ضریب اصطکاک در

شکل 22 مقایسه تنش‌های پسماند طولی، حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی؛ الف) نمونه 1، ب) نمونه 13، ج) نمونه 18

1- Aging

مدل‌سازی عددی و استفاده از روش حرارتی برای مدل‌سازی (در نظر نگرفتن جریان مواد و اختلاط)، از جمله دلایل این اختلاف هستند. با توجه به شکل 22، تنش‌های پسماند طولی در ناحیه میانی از سطح نمونه‌ها که در تماس با شانه ابزار است (عرض تقریبی 20 میلی‌متر)، دارای مقادیر مثبت و بیشینه نسبت به سایر نواحی است؛ که علت آن نرخ حرارتی بالا در این ناحیه است.

در شکل 23 تغییرات مقادیر میانگین تنش‌های پسماند طولی در فاصله عرضی ±10mm نسبت به خط جوش، بر حسب سرعت‌های متفاوت دورانی و پیشروی ابزار نشان داده شده است. شکل 23 نشان می‌دهد در یک سرعت پیشروی ثابت، با افزایش سرعت دورانی ابزار، مقادیر میانگین تنش‌های پسماند طولی افزایش می‌یابد که علت آن افزایش نرخ حرارت در ناحیه جوشکاری است. همچنین در یک سرعت دورانی ثابت، با افزایش سرعت پیشروی، سختی در ناحیه جوشکاری و مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک بالاتر خواهد رفت؛ در نتیجه مقادیر میانگین تنش‌های پسماند طولی افزایش می‌یابد.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق پس از انجام فرایند جوشکاری با پارامترهای جوش متفاوت، مناسب‌ترین پارامترها مانند سرعت دورانی، سرعت پیشروی، نیروی فورج، شکل و زاویه گوه‌ای ابزار جهت ایجاد جوش بدون نقص تعیین شده و سپس آزمایش‌های متالوگرفی، تعیین سختی و تنش‌پسماند، بر روی نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت‌های دورانی و پیشروی متفاوت ابزار، انجام شده و نتایج زیر بدست آمده است:

- آزمایش‌های متالوگرافی انجام شده بر روی مقطع ناحیه جوشکاری تغییرات ریزساختار را در نواحی متفاوت از مقطع جوش نشان می‌دهد. در ناحیه متلاطم که تحت تأثیر تغییر شکل‌های پلاستیک و شرایط دمایی بسیار بالا قرار گرفته است، تبلور مجدد رخ داده و ساختار دانه‌ها بسیار ریزتر از فلز پایه است. در ناحیه متأثر ترمومکانیکی، ریزساختار تحت تأثیر حرارت و کار مکانیکی قرار گرفته، دانه‌ها دارای نظم کمتری نسبت به فلز پایه بوده و اثر تغییر شکل و دوران دانه‌ها در این ناحیه دیده می‌شود. در ناحیه متأثر حرارتی که تغییر شکل پلاستیک در آن رخ نداده است، ساختار دانه‌ها نسبت به نواحی متلاطم و متأثر ترمومکانیکی، منظم‌تر است.

- با توجه به آنکه آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 دارای قابلیت عملیات حرارتی است، رسوب‌های بسیار ریز Al_2CuMg که عامل اصلی افزایش سختی هستند، با اعمال حرارت نسبتاً بالا در زمینه حل می‌شوند و در نتیجه سختی در مناطق حرارت دیده نسبت به فلز پایه کاهش می‌یابد. در ناحیه متلاطم که بیش‌ترین نرخ حرارت وجود دارد، سختی دارای کمترین مقدار نسبت به سایر نواحی است. با افزایش سرعت پیشروی و کاهش سرعت دورانی ابزار، انحلال رسوب‌های استحکام دهنده، کمتر شده و در نتیجه افت سختی در ناحیه جوشکاری کاهش می‌یابد.

شکل 23 تنش‌های پسماند طولی در سرعت‌های دورانی و پیشروی متفاوت

- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی برای تنش‌های پسماند طولی با نتایج تجربی، تطابق مناسبی را بین آن‌ها نشان می‌دهد. بنابراین شبیه‌سازی عددی به شیوه حرارتی می‌تواند به عنوان یک روش مناسب برای پیش‌بینی تنش پسماند در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به کار رود.
- با افزایش سرعت دورانی و پیشروی ابزار، تنش‌های پسماند طولی افزایش می‌یابند؛ زیرا افزایش سرعت دورانی باعث افزایش نرخ حرارت، و افزایش سرعت پیشروی باعث کاهش افت سختی و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک در ناحیه جوشکاری خواهد شد.

6- مراجع

[1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-Smith, C. J. Dawes, *Friction stir butt welding,* International Patent Application No. PCT/GB92/02203, 1991.

[2] F. Gemme, Y. Verreman, L. Dubourg, M. Jahazi, Numerical analysis of the dwell phase in friction stir welding and comparison with experimental data, *Material Science Engineering A,* Vol. 527, pp. 4152–4160, 2010.

[3] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering R,* Vol. 50, pp. 1-78, 2005.

[4] M. Guerra, C. Schmidt, J. C. McClure, L. E. Murr, A. C. Nunes, Flow patterns during friction stir welding, *Materials Characterization,* Vol. 49, No. 2, pp. 95-101, 2002.

[5] M. A. Sutton, Y. Bangcheng, A. P. Reynolds, Y. Junhui, Banded microstructure in 2024-T351 and 2524-T351 aluminum friction stir welds Part II. Mechanical characterization, *Materials Science and Engineering,* Vol. 364, pp. 66-74, 2004.

[6] A. Lotfi, S. Nourouzi, The microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7075-T6 aluminum alloy by the use of design of experiment, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 3, pp. 17-26, 2014. (In Persian)

[7] A. Cirello, G. Buffa, L. Fratini, S. Pasta, AA6082-T6 friction stir welded joints fatigue resistance: Influence of process parameters, *Int Mech E Part B Journal of Engineering Manufacturing,* Vol. 220, No. 6, pp. 805-812, 2006.

[8] S. Nourouzi, M. shakeri, M. Habibnia, Frictions stir welding of diddimilar metal Al5050 Aluminum alloy to AISI304 stainless steel, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 12, No. 6, pp. 95-103, 2013. (In Persian)

[9] M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss, P. J. Withers, Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds, *Acta Materialia,* Vol. 51, No. 16, pp. 4791-4801, 2003.

[10] P. Staron, M. Kocak, S. Williams, Residual stresses in friction stir welded Al sheets, *Applied Physics A: Materials Science and Processing,* 74(SUPPL.II):S1161-S1162, 2002.

[11] P. Prevey, M. Mahoney, Improved fatigue performance of friction stir welds with low plasticity burnishing: residual stress design and fatigue performance assessment, *Materials Science Forum,* Vols. 426-432, pp. 2933-2940, 2003.

[12] L. Fratini, B. Zuccarello, An analysis of through-thickness residual stresses in aluminium FSW butt joints, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 46, No. 6, pp. 611-619, 2006.

[13] L. Fratini, S. Pasta, A. P. Reynolds, Fatigue crack growth in 2024-T351 friction stir welded joints: Longitudinal residual stress and microstructural effects, *International Journal of Fatigue,* Vol. 31, No. 3, pp. 495-500, 2009.

[14] Y. J. Chao, X. Qi, W. Teng, Heat transfer in friction stir welding - Experimental and numerical studies, *Transaction of the ASME,* Vol. 125, pp. 138-145, 2003.

[15] C. Chen, R. Kovacevic, Thermomechanical modelling and force analysis of friction stir welding by the finite element method, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,* Vol. 218, No. 5, pp. 509-520, 2004.

[16] M. Z. H. Khandkar, J. A. Khan, A. P. Reynolds, M. A. Sutton, Predicting residual thermal stresses in friction stir welded metals, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 174, pp. 195-203, 2006.

[17] A. H. Azizi, V. Zakeri, A. Mostofizadeh, R. Azarafza, Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminum alloy joints, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 13, No. 12, pp. 56-66, 2013. (In Persian)

[18] S. Rajakumar, C. Muralidharan, V. Balasubramanian, Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminum alloy joints, *Material and Design,* Vol. 32, No. 2, pp. 535-549, 2011.
[19] H. Su, C. S. Wu, A. Pittner, M. Rethmeier, Simultaneous measurement of tool torque, traverse force and axial force in friction stir welding, *Journal of Manufacturing processes,* Vol. 15, No. 4, pp. 495-500, 2013.
[20] D. Trimble, G. E. O'Donnell, J. Monaghan, Characterisation of tool shape and rotational speed for increased speed during friction stir welding of AA2024-T3, *Journal of Manufacturing processes,* In Press, DOI: 10.1016/j.jmapro.2014.08.007, 2014.
[21] ASTM E3-01, Standard guide for preparation of metallographic specimens, *American Society for Testing and Materials,* West Conshohocken, 2008.
[22] ASTM E384, Standard test method for microindentation hardness of materials, *American Society for Testing and Materials,* West Conshohocken, 2008.
[23] P. Prevey, *X-ray diffraction residual stress techniques, Metals Handbook,* pp. 380-392, Metals Park: American Society for Metals, 1986.
[24] T. Adachi, S. T. Nakayama, T. Kusunose, K. Niihara, Measurement of microscopic stress distribution of multilayered composite by X-ray stress analysis, *J. Materials Letters,* Vol. 57, No. 20, pp. 3057-3062, 2003.
[25] M. E. Hilly, Residual stress measurement by X-ray diffraction, SAE J784a, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, pp. 19, 1971.
[26] M. Z. H. Khandkar, J. A. Khan, A. P. Reynolds, Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model, *Science and Technology of Welding and Joining,* Vol. 8, No. 3, pp. 165–174, 2003.
[27] M. Assidi, L. Fourment, Accurate 3D friction stir welding simulation tool based on friction model calibration, *Int J Mater Form,* Vol. 2, No. 1, pp. 327–330, 2009.
[28] H. Schmidt, J. Hattel, J. Wert, An analytical model for the heat generation in friction stir welding, *Model Simul Mater Sci Eng,* Vol. 12, No. 1, pp. 143–157, 2004.
[29] H. Schmidt, J. Hattel, Modelling heat flow around tool probe in friction stir welding, *Science and Technology of Welding and Joining,* Vol. 10, No. 2, pp. 176–186, 2005.
[30] G. R. Johnson, W. H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high rates and high temperatures, *in Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics,* The Netherlands The Hague, pp. 541-547, 1983.
[31] C. M. Chen, R. Kovacevic, Finite element modeling of friction stir welding-thermal and thermomechanical analysis, *International Journal of Machine Tools &Manufacture ,* Vol. 43, No. 13, pp. 1319–1326, 2003.
[32] D. R. Lesuer, *Experimental investigations of material models for Ti-6Al-4V titanium and 2024-T3 aluminum,* NTIS, Springfield, Virginia, pp. 13-20, 2000.
[33] J. A. Al-Jarrah, S. Swalha, T. A. Mansour, M. Ibrahim, M. Al-Rashdan, D. A. Al-Qahsi, Welding equality and mechanical properties of aluminum alloys joints prepared by friction stir welding, *Materials and Design ,* Vol. 56, pp. 929–936, 2014.
[34] F. William, Smith, *Structure and properties of engineering materials,* Second Edition, pp. 198-203, New York: McGraw-Hill, 1987.